

Mechanismen zur Verminderung der dynamischen Schweißkraft von Silber-Metalloxiden

Dr. Michael Bender, Dr. Timo Mützel, Ralf Niederreuther, Umicore AG & Co. KG, Hanau-Wolfgang, Germany, michael.bender@eu.umicore.com

Kurzfassung

Die dynamische Schweißkraft elektrischer Kontakte ist für die Funktion von Schaltgeräten eine bestimmende, sicherheitsrelevante Eigenschaft. Ihre Größe ergibt sich in der Praxis aus dem individuellen Geräteverhalten beim Einschalten (Prellen) und ist darüber hinaus in entscheidendem Maße auf den verwendeten Kontaktwerkstoff zurückzuführen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Verschweißmechanismen beim Schalten von Silbermetalloxid-Werkstoffen aufzuzeigen und hieraus Wege zur Verminderung der Schweißkräfte abzuleiten.

Zur Untersuchung der für das Verschweißverhalten maßgeblichen Einflussgrößen wurden in der vorliegenden Arbeit Geräte und Modell-Schaltversuche durchgeführt und auf deren Basis Modelle entwickelt, welche die Verschweißmechanismen der Werkstoffe beschreiben. Hierzu wurden das Verschweißverhalten verschiedener Silber-Metalloxiid-Werkstoffe (Ag/CdO, Ag/SnO₂, Ag/ZnO) sowie der Einfluss von niedrig- (Bi₂O₃) und hochschmelzenden (CuO, WO₃) Additiven auf das System Ag/SnO₂ als Funktion des Energieeintrages vergleichend gegenübergestellt. Es wurden Mechanismen zur Beschreibung des Verschweißverhaltens in Abhängigkeit von Energieeintrag und Wirkkomponenten postuliert und validiert. Metallurgische Untersuchungen untermauern die beschriebenen Mechanismen für Lichtbogenleistungen unterhalb 0,3 Ws, zwischen 0,3 und 10 Ws sowie oberhalb 10 Ws.

Im Ergebnis stellt die vorliegende Arbeit eine grundlegende wissenschaftliche Basis zur Beschreibung der Wechselwirkungen von Materialzusammensetzung, Lichtbogenfußpunktenergie und resultierender Verschweißcharakteristik dar und kann somit als Handlungsempfehlung für die gezielte Auswahl von Werkstoffen für Schaltapplikationen, bei welchen die dynamische Schweißkraft als sicherheitsrelevanter Faktor eine übergeordnete Rolle spielt, angesehen werden.

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit sowie die Sicherheit elektrischer Energie sind Schlüsselfaktoren einer modernen Gesellschaft. Der in Folge der Energiewende steigende Einsatz effizient arbeitender Elektromotoren verlangt nach höheren Schaltkapazitäten und Einschaltströmen vom 15-20fachen des Nennstromes [1]. Die herkömmliche Geräteprüfung bei 6-12fachem Nennstrom ist damit nicht mehr praxisnah und es gilt, den gestiegenen Anforderungen hinsichtlich des dynamischen Schweißverhaltens beim Einschalten, bedingt durch gerätecharakteristische Prellvorgänge, gerecht zu werden.

Das dynamische Schweißverhalten elektrischer Kontakte während des Einschaltens ist Kriterium für die Entwicklung und die anwendungsspezifische Auswahl von Kontaktwerkstoffen. Ein grundlegendes Verständnis der Verschweißmechanismen innerhalb der wichtigen Gruppe der Silbermetalloxidkontaktwerkstoffe stellt die Basis für eine gezielte Materialauswahl in den verschiedenen Leistungsklassen dar und ist das Ziel der vorliegenden Arbeit.

2 Experimentelle Vorgehensweise

Das dynamische Schweißverhalten verschiedener Kontaktwerkstoffkombinationen kann nur unter genau definierten, stabilen Randbedingungen (Prellbedingungen)

verglichen werden. Wichtigste Kenngrößen des Prellvorgangs beim Einschalten sind der Stromfluss unter Lichtbogen, der Abstand der Kontaktstücke beim Abheben (Lichtbogenmodus), die Lichtbogen-/Prelldauer, die Kontaktkraft und der Schließimpuls beim Aufeinandertreffen der Kontakte.

Für die Versuchsdurchführung müssen entsprechende realitätsbezogene Randbedingungen wie in Relais, Schützen etc. geschaffen werden.

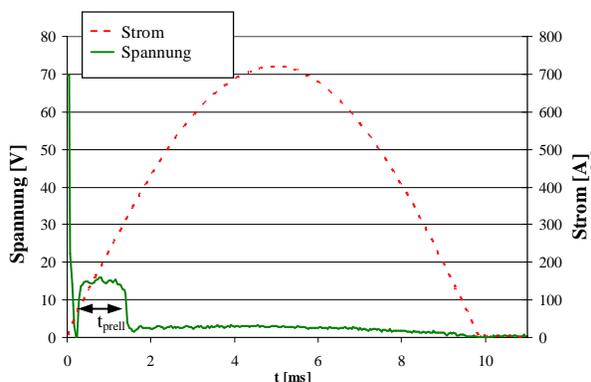


Bild 1 Zeitlicher Verlauf von Strom und Spannung beim Einschalten (Modellschalter)

Die im Prelllichtbogen umgesetzte elektrische Energie W_E , die auf den Kontaktwerkstoff einwirkt, wird berechnet durch Multiplikation des Anoden-Kathoden-Spannungsabfalls U_{AK} und dem Stromintegral über die Prelldauer t_{prell} :

$$W_E = U_{AK} \cdot \int_{t_{prell}} i(t) dt \quad (1)$$

Reproduzierbare Ergebnisse der Einschalt-Modellschalter-Versuche wurden erzielt, indem durch einen mechanisch stabilen Aufbau die Prelldauer konstant gehalten, der Schaltvorgang netzsynchron ausgeführt und somit Spitzenstrom und Prelllichtbogenenergie bei stabilen Werten mit geringer Streubreite lagen. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus findet sich in [2]. Zur Vermeidung von Materialwanderung wurden die Versuche bei alternierender Polung der Elektroden durchgeführt.

Alle hier behandelten Materialien wurden über einen pulvermetallurgischen Prozess (Mischen, Kompaktieren, Sintern, Strangpressen) hergestellt. Die Materialzusammensetzungen werden in Gewichtsprozent angegeben.

3 Einfluss von Metalloxid-Konzentration und Partikelgröße

Zunächst wurden der Einfluss des Gesamtoxidgehaltes und der Oxidpartikelgröße auf die Schweißkräfte untersucht. Als eines der gängigsten Basisoxide in Kontaktwerkstoffen wurde SnO_2 ausgewählt. An Ag/SnO_2 Kompositwerkstoffen wurden Einschaltmodellschalter-Versuche unter Versuchsbedingungen, wie in Tabelle 1 beschrieben durchgeführt.

Parameter	Wert
Spannung U	230 V (AC)
Strom (Spitzenwert) \hat{i}	700 und 1.300 A
Leistungsfaktor $\cos\varphi$	0,35
Schließgeschwindigkeit v	1 m/s
Prelldauer t_{bounce}	1 ms
Mittlere Prell-Lichtbogenenergie W_E	4,5 und 8,0 Ws
Kontaktkraft F	3,5 N
Schaltzahl n	300
Kontaktdurchmesser D	4,0 mm

Tabelle 1 Versuchsbedingungen im Einschalt-Modellschalter (AC)

In Bild 2 ist der typische Verlauf der Verschweißkräfte für additivfreie Silber-Zinnoxid-Werkstoffe mit einem SnO_2 -Anteil von 4 bis 14 Gew.-% dargestellt. Die Ergebnisse (Bild 2) wurden im beschriebenen Einschaltmodell-

schalter bei einem Spitzenstrom von $\hat{i} = 700$ A erzielt und bereits in [2] veröffentlicht.

Demnach nehmen, wie auch in [3, 4] gezeigt, die Schweißkräfte mit Zunahme des Metalloxidgehaltes im Kontaktwerkstoff ab. Durch den hohen teilweise verschlackend wirkenden Metalloxidanteil, einhergehend mit einer starken Oxidbelegung der Silberkorngrenzen in der Verschweißzone, kommt es hier zu einer Reduzierung der Silberbindeanteile und damit der Verschweißbeugung.

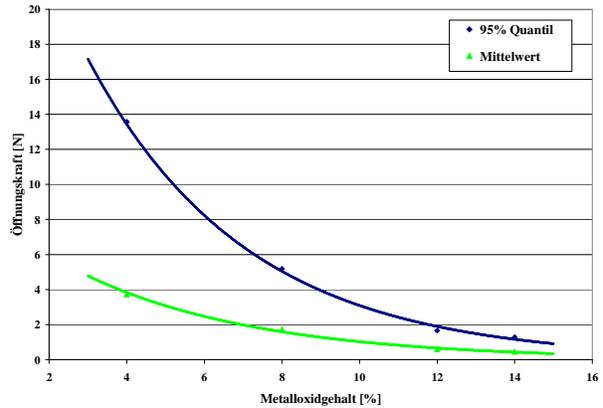


Bild 2 Schweißkräfte in Abhängigkeit des SnO_2 -Gehaltes

Zusätzlich wurde der Einfluss der Metalloxid-Partikelgrößen auf die Schweißkräfte untersucht. Bei einem konstanten SnO_2 -Anteil von 12 % im Kontaktwerkstoff, wurden drei verschiedene SnO_2 -Partikelgrößen eingesetzt und die Verschweißkraft vergleichend gegenübergestellt. Die Versuche wurden bei einem Spitzenstrom von $\hat{i} = 1300$ A durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt.

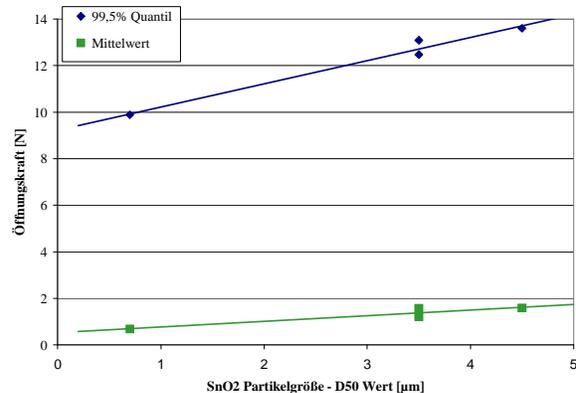


Bild 3 Schweißkräfte in Abhängigkeit der SnO_2 -Partikelgröße von Ag/SnO_2 88/12

Sowohl die Mittelwerte als auch die Werte für das 99,5% Quantil zeigen einen Anstieg der Schweißkräfte mit zunehmendem mittlerem Partikeldurchmesser. Dies ist auf die im Vergleich hohe Belegung der Silberkorngrenzen mit feineren Oxidpartikeln zurückzuführen, welche den Werkstoffverbund schwächen. Dieses Ergebnis lässt sich

pauschal nicht auf andere Schaltlasten übertragen. Bedingungen, die zu einer Vergrößerung des SnO₂ beim Schalten führen, gehen mit einer Verschiebung der Schweißkräfte entlang der x-Achse zu höheren Schweißkräften einher.

4 Schweißverhalten bei niedrigen und mittleren Lichtbogenenergien

Silber-Metalloxid-Werkstoffe kommen als Schaltkontakte in einem äußerst breiten Spektrum von Anwendungen, wie Relais, Schützen oder Leistungsschaltern zum Einsatz. Hierbei wird anwendungsspezifisch auf bestimmte Haupt- und Zusatzoxide (Additive) zurückgegriffen. In Tabelle 2 sind die in der vorliegenden Studie untersuchten Kontaktwerkstoffe dargestellt.

Kontaktwerkstoff	Additive
Ag/CdO 90/10 SP	Keine
Ag/SnO ₂ 88/12 SP	Keine
Ag/SnO ₂ 88/12 SPW7	Bi ₂ O ₃ , WO ₃
Ag/SnO ₂ 88/12 PMT1	Bi ₂ O ₃ , CuO
Ag/SnO ₂ 86/14 PMT3	Bi ₂ O ₃ , CuO
Ag/ZnO 92/8 SP	Keine

Tabelle 2 Untersuchte Kontaktwerkstoffe und Zusammensetzung

Schmelz- und Siedepunkte der eingesetzten Komponenten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Metalloxid (Referenz: Ag)	Schmelzpunkt [°C]	Siedepunkt [°C]
Ag	962	2.210
Bi ₂ O ₃	817	1.890
CuO	1.326	2.000
WO ₃	1.473	1.700
CdO	1.559	1.559
SnO ₂	1.630	1.800 – 1.900
ZnO	1.975	1.975

Tabelle 3 Eigenschaften der eingesetzten Komponenten

Zur Simulation niedriger und mittlerer Energiebereiche in der Anwendung wurden in einem Einschalt-Modellschalter Versuche bei verschiedenen Prell-Lichtbogenenergien durchgeführt. Die Versuchsbedingungen sind in Tabelle 4 dargestellt. Durch Anpassung der Versuchsaufbauten konnten Randbedingungen wie Prellverläufe, charakterisiert durch Kontaktkraft und Prelldauer, anwendungsorientiert nachgestellt werden. Nur so können ver-

lässliche Vorhersagen zum Verhalten der Werkstoffe in der jeweiligen Anwendung getroffen werden.

Parameter	Wert			
Spitzenstrom \hat{i}	100 A	35 A	700 A	1.300 A
Last	Lampenlast	Lampenlast	Induktive Last	Induktive Last
Kontaktkraft F	75 cN	75 cN	3,5 N	3,5 N
Kontaktdurchmesser D	3,0 mm	3,0 mm	4,0 mm	4,0 mm
Zyklenzahl n	2.000	5.000	300	300
Prelldauer t_{prell}	0,4 ms	1,5 ms	1,0 ms	1,0 ms
Prelllichtbogenenergie W_E	0,09 Ws	0,4 Ws	4,5 Ws	8,0 Ws

Tabelle 4 Randbedingungen für die Durchführung von Modellschalter-Versuchen

In Bild 4 sind die Schweißkräfte (99,5 % Quantil) gegen die mittlere Prell-Lichtbogenenergie aufgetragen. Jeder Punkt steht hierbei für eine Testreihe mit n Schaltzyklen und dazugehörigen Kraftmessungen (Tabelle 4).

Für die verschiedenen Basisoxide (additivfrei) werden die höchsten Schweißkräfte für Ag/CdO 90/10 gemessen, gefolgt von Ag/ZnO 92/8 und Ag/SnO₂ 88/12. Dies ist mitunter auf die unterschiedlichen Metalloxid-Volumenanteile zurückzuführen (SnO₂: 17,1 Vol%, ZnO: 14,5 Vol%, CdO: 12,5 Vol.%). Bekannt hingegen ist [5], dass Ag/SnO₂ bei den beschriebenen Randbedingungen bzw. im entsprechenden Anwendungsfeld die niedrigsten Schweißkräfte, selbst bei vergleichbaren Metalloxidgehalten zeigt.

Zur Reduzierung der Schweißkräfte kommen in Ag/SnO₂-Werkstoffen Bi₂O₃, WO₃ oder Kombinationen aus Bi₂O₃ und CuO als Additive zum Einsatz.

Zur vergleichbaren Darstellung der Ergebnisse wurde eine relative Schweißkraft als Quotient der 99,5%-Quantile der gemessenen Schweißkraft und der mittleren Einschaltenergie definiert. In Bild 5 ist diese gegen die mittlere Einschaltenergie aufgetragen. Um den sehr weiten Bereich der relativen Schweißkräfte der verschiedenen Materialklassen übersichtlich darstellen zu können, mussten die Werte logarithmisch aufgetragen werden.

Im Bereich von 0,3 Ws bis 10 Ws mittlerer Einschaltenergie werden nahezu konstant hohe relative Schweißkräfte gemessen, während unterhalb von 0,3 Ws ein signifikanter Anstieg zu verzeichnen ist. Dieses Verhalten wurde bereits für Ag/Ni 80/20 beschrieben und ist auf verschiedene Lichtbogenmodi zurückzuführen [6].

Bei kürzeren Prelldauern mit entsprechend verminderten Prellhöhen entwickeln sich bevorzugt Anodenbögen, welcher sehr enge und tiefe Aufschmelzbereiche und somit extrem hohe Verschweißkräfte verursachen. Mit zunehmenden Prelldauern und Prellhöhen dominieren dagegen die sich dann ausbildenden Kathodenbögen mit eher flächenhaften, weniger tiefen Schmelzbereichen und somit geringeren Schweißkräften.

Unter allen getesteten Werkstoffen zeigen Bi_2O_3 - und CuO -dotierte Ag/SnO_2 -Werkstoffe bis etwa 10 Ws Prell-Lichtbogenenergie die niedrigsten Öffnungskräfte. Bei genauerer Betrachtung des verschweißten Gefüges, lässt sich dieses Verhalten erklären. In Bild 6 ist ein Ausschneiden des Bi_2O_3 hin zur Kontaktoberfläche, wo es einen glasartigen spröden Film bildet mittels EDX (energie-dispersive Röntgenspektroskopie) festzustellen. Niedrigschmelzende Oxide mit Schmelztemperaturen unterhalb derer des Silbers (Bi_2O_3 , $T_{\text{Schmelz}} = 817 \text{ }^\circ\text{C}$) erstarren glasartig auf den Korngrenzen des Silbers und führen zu einer Versprödung und damit einer Schwächung des Werkstoffverbundes in der Aufschmelzzone. Daher eignen sich diese Oxide besonders zur Reduzierung der Schweißkräfte für Anwendungen bei mittleren Lichtbogenenergien.

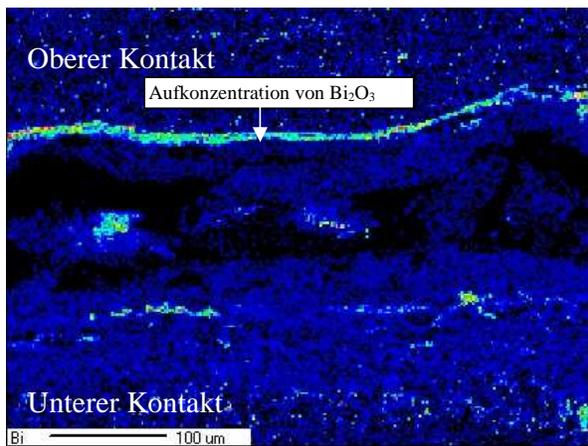


Bild 6 EDX-mapping an Probenschliff einer geschalteten Probe

5 Verschweißkräfte bei hohen Lichtbogenenergien

In einem weiteren Schritt wurden die Effekte auf Verschweißkräfte bei höheren Einschaltenergien (bis etwa 100 Ws), wie sie bei großen Schützen, Leistungsschutz-

schaltern oder Lasttrennschaltern auftreten, untersucht. Hierzu wurden Einschaltvermögensversuche nach IEC-60947-3 bei einem prospektiven Kurzschlussstrom von $\hat{i}_{\text{prosp}} = 50 \text{ kA}$ durchgeführt (Strombegrenzung auf $\hat{i} = 10 \text{ kA}$), bei denen die Abschaltung durch eine in Reihe geschaltete 100 A NH-Sicherung erfolgte. Verglichen wurde das Verhalten von Ag/ZnO - und Ag/SnO_2 -Kontaktwerkstoffen mit den Additiven Bi_2O_3 und CuO . Hierzu liegen derzeit keine quantitativen Werte vor. Die Kontakte sind beim Versuch entweder fest verschweißt, oder konnten vom Schaltgerät wieder geöffnet werden.

Bild 7 zeigt einen Querschnitt durch ein Ag/SnO_2 88/12 (Additiv: CuO) Kontaktpaar nach dem Schaltversuch im Lichtmikroskop. Zu sehen sind durch den Prelllichtbogen stark verschweißte Kontakte, welche nicht mehr zu öffnen waren. CuO führt hierbei zu einer Vergrößerung des SnO_2 , verbunden mit einer Reduzierung der Schmelztemperatur des Silbers im Bereich der $\text{Ag}-\text{CuO}$ -Grenzflächen, was mitunter mit einer guten Benetzung der SnO_2 -Partikel mit der Silberschmelze einhergeht. Aus diesem Grund ist die Schweißkraft bzw. die Verschweißneigung erhöht.

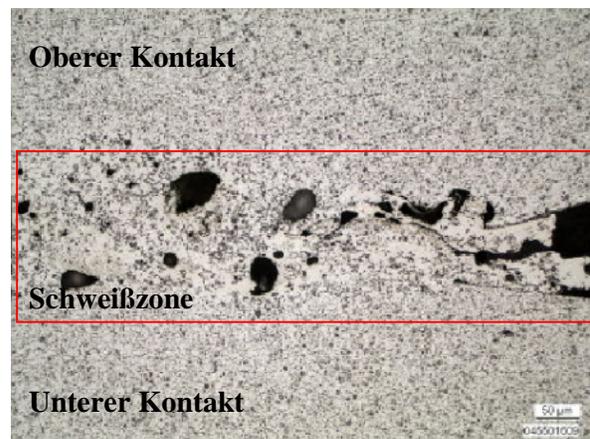


Bild 7 Querschnitt von Ag/SnO_2 88/12 (Additiv: CuO) nach Schaltversuch

Eine Kombination der Additive Bi_2O_3 und CuO führt bekanntermaßen zu reduzierten Schweißkräften in Ag/SnO_2 88/12 bei mittleren Lichtbogenenergien (Abschnitt 4). Bei hohen Lichtbogenenergien jedoch verschweißt das Material ähnlich stark wie ein $\text{Ag}/\text{SnO}_2/\text{CuO}$ Werkstoff. Ein Öffnen war auch hier nach dem Schaltversuch nicht mehr möglich. Bild 8 zeigt einen Gefügequerschnitt (Lichtmikroskop) des Kontaktpaares.

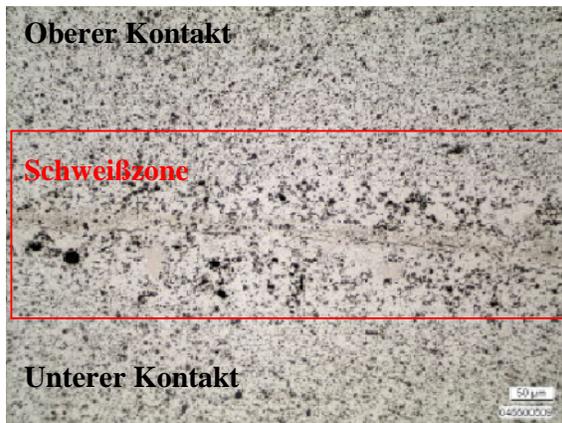


Bild 8 Querschnitt von Ag/SnO₂ 88/12 (Additiv: CuO und Bi₂O₃) nach Schaltversuch

EDX-Untersuchungen an verschweißten Ag/SnO₂ 88/12 (Bi₂O₃/CuO) Kontaktstücken zeigen eine nahezu vollständige Verarmung an Bi₂O₃ innerhalb der verschweißten Zone (Bild 9). Aufgrund der hohen Prelllichtbogen-Energien kommt es zu einem Verlust des Verschweißinhibitors Bi₂O₃ durch Verdampfen.

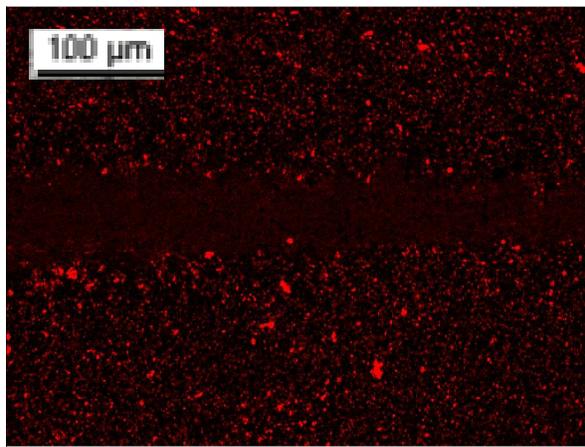


Bild 9 Bi₂O₃-Verteilung (EDX-Mapping) an einer verschweißten Ag/SnO₂ 88/12 (Bi₂O₃/CuO) Probe nach Schaltversuch

Im Falle des höher verdampfenden (sublimierenden) Zinkoxids im Werkstoff Ag/ZnO 92/8 können die Kontakte nach Durchführung der Schaltversuche wieder geöffnet werden. In Bild 10 ist der Querschnitt (Lichtmikroskop) eines solchen Kontaktes dargestellt.



Bild 10 Querschnitt (Lichtmikroskop) von Ag/ZnO 92/8 nach Schaltversuch.

Auch hier wurde eine EDX-Analyse zur Bestimmung der Elementverteilung nach dem Schaltversuch durchgeführt. In der Wärmeeindringzone können Zinkoxidschichten sowohl auf dem Kontakt, als auch auf den Innenwänden der Poren innerhalb einer schaumartigen Struktur nachgewiesen werden.

Demnach lässt sich ein Mechanismus zur Erklärung der schweißresistenten Wirkung von ZnO in Ag/ZnO Kontaktwerkstoffen formulieren. Einerseits kommt es zu einem Agglomerieren des ZnO innerhalb der Silberschmelze und damit zur Ausbildung von verschweißhemmenden Oxidschichten, andererseits führt die Sublimation von ZnO bei ausreichend hohem Energieeintrag ($T_{\text{Subl.}} = 1975 \text{ °C}$) zur Ausbildung von Gasblasen in der Silberschmelze. Während der Abkühlung rekristallisiert das gasförmige ZnO auf den inneren Wänden der Blasen, wobei sich eine schaumartige Mikrostruktur ausbildet, welche beim Öffnen des Schalters relativ leicht mechanisch aufgebrochen werden kann.

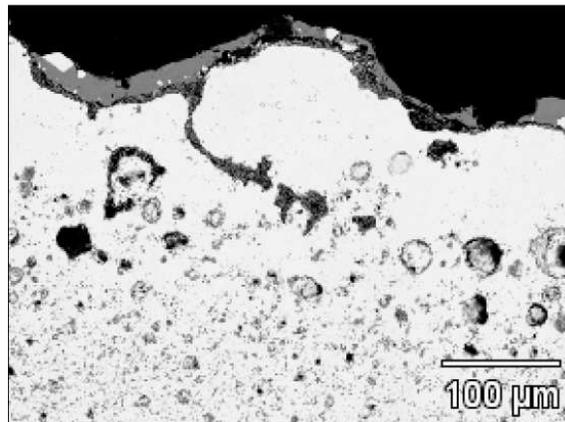


Bild 11 Querschnitt (REM) einer Ag/ZnO 92/8 Probe nach dem Schalten

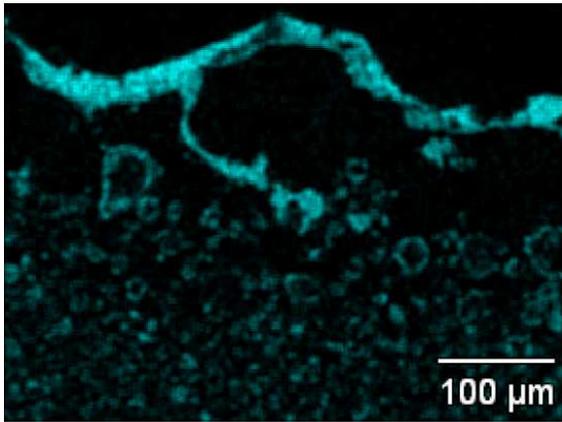


Bild 12 Elementverteilung (EDX) im Querschnitt einer Ag/ZnO 92/8 Probe nach dem Schalten

6 Zusammenfassung

Es wurden Versuche zur Beschreibung der dynamischen Schweißkräfte von Kontaktmaterialien unterschiedlicher Zusammensetzung für verschiedene Anwendungsbereiche durchgeführt. Die Resultate erlaubten es, auf Basis metallurgischer Untersuchungen Verschweißmechanismen für diese Werkstoffe zu formulieren. Es konnten folgende Einflussgrößen und Wechselwirkungen identifiziert werden:

- Die Prelllichtbogen-Energie ist ein Schlüsselparаметer für das Verschweißverhalten von Werkstoffen beim Einschaltvorgang. Sie bestimmt den Verschweißmechanismus und damit Funktion des Kontaktwerkstoffsystems.
- Die Art und das Volumen des eingesetzten Basisoxides wirken sich signifikant auf die Verschweißkräfte aus. Bei niedrigen und mittleren Lichtbogenenergien zeigen SnO₂-haltige Werkstoffe bessere Kennwerte, als solche auf Basis von CdO oder ZnO. Mit zunehmendem Oxidgehalt nimmt die Verschweißneigung der Materialien in aller Regel ab.
- Speziell hinsichtlich niedriger und mittlerer Energieeinträge zeigen Werkstoffe mit homogener feindisperser Partikelgrößenverteilung Vorteile.
- Niedrigschmelzende Additive, wie beispielsweise Bi₂O₃ führen bei niedrigen und mittleren Lichtbogenenergien zu einer deutlichen Reduzierung der Verschweißneigung durch Ausbildung spröder Phasen in der Wärmeeindringzone.
- Bei höheren Lichtbogenenergien führen sublimierende Additive wie ZnO zu einer Ausbildung schaumartiger Mikrostrukturen und damit einer Reduzierung der Öffnungskräfte.

Alle beschriebenen Effekte müssen bei der Auswahl geeigneter Materialien bereits in der Entwicklungsphase von Schaltgeräten zugrunde gelegt werden.

7 Literatur

- [1] Krätzschmar, A.; Herbst, R.; Nothnagel, F.; Berger, F.: Kontaktschwebungen als limitierendes Phänomen beim Ein- und Ausschaltverhalten von Schützen. 19. Albert-Keil-Kontaktseminar, Germany, 2007
- [2] Mützel, T.; Braumann, P.; Niederreuther, R.: Experimental Investigations on Material Influences of Silver-Metal-Oxide Contact Materials for Contactor Applications. 54th International Scientific Colloquium (IWK), Ilmenau, Germany, 2009
- [3] Leung, C; Streicher, E.; Fitzgerald, D.: Welding Behavior of Ag/SnO₂ Contact Material with Microstructure and Additive Modifications, 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Seattle, WA, USA, 2004
- [4] Chen, Z. K.; Witter, G. J.: A Study of Dynamic Welding of Electrical Contacts with Emphasis On the Effects of Oxide Content for Silver Tin Indium Oxide Contacts, 25th International Conference on Electrical Contacts (ICEC) & 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Charleston, SC, USA, 2010
- [5] Mützel, T.; Niederreuther, R.: Advanced Silver-Tinoxide Contact Materials for Relay Application, 26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC), Beijing, China, 2012
- [6] Rieder, W.; Neuhaus, A.: Contact welding influenced by anode arc and cathode arc, respectively, 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Seattle, WA, USA, 2004
- [7] Ambier, J.; Bourda, C.; Jeannot, D.; Pinard, J.; Ramoni, P.: Modification in the Microstructure of Materials with Air-Break Switching at High Currents, 15th International Conference on Electrical Contacts (ICEC) & 36th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Montreal, Canada, 1990
- [8] Mützel, T.; Niederreuther, R.: Contact Material Combinations for High Performance Switching Devices, 58th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Portland, OR, USA, 2012